

南京市电力负荷特征及夏季极端负荷与气象条件关系

李艳¹ 俞剑蔚^{2*} 蔡芎宁³ 范晓青¹ 黄琰¹

(1 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081; 2 江苏省气象台, 南京 210008;

3 中国气象局国家气象中心, 北京 100081)

摘要 基于南京地区 2014—2016 年逐日电力负荷资料, 采用谐波分析、功率谱等方法分析该地区电力负荷的变化规律及其与自然周的关系, 并对极端电力负荷日中离差曲线型与气温、湿度等气象要素及环流形势的关系进行分析。结果表明: 南京地区电力负荷的季节变化呈双峰型; 在季节内(月际)尺度上, 存在 30 d 周期; 在月内尺度上, 存在 7 d 周期且与自然周同步。夏季极端负荷日离差曲线主要存在 3 种类型: 典型双峰型(I)、单峰型(II)、非典型双峰型(III)。I 型和 III 型与气温和炎热指数均呈显著正相关, 而 3 种类型都与相对湿度呈显著负相关。I 型对应环流场上副高持续控制南京地区, 冷空气活动偏弱, 气温日变化小; II 型对应冷空气活动频繁, 副高具有东西摆动特征, 南京常出现阵雨或雷阵雨天气; III 型对应的副高强度弱于 I 型, 冷空气强度弱于 II 型。采用逐步回归方法建立极端负荷日的预测模型, 3 种型的平均相对误差分别为 6.4%、5.6% 和 5.3%, 较好地对比极端电力负荷进行了定量预报。

关键词 电力负荷; 极端负荷日; 功率谱; 交叉谱; 气象条件

中图分类号: P49 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20200259 **文献标识码:** A

引言

近年来, 随着我国社会经济高速发展, 城市规模不断扩大, 各行业生产经营以及人民生活用电量都在不断攀升, 其中生活用电的增长尤其迅速, 造成电网运行负荷越来越重, 而当电网在高负荷运行时, 输变电设备极易发生故障, 并产生电网瘫痪和局部停电事件, 给社会生产和人民生活造成巨大影响和损失。特别在我国经济发达城市的夏季, 近年时常出现异常持续高温天气, 城市电网负荷不断突破历史极值, 电网运行风险巨大, 为了防止电网瘫痪, 城市不得不对部分生产经营活动拉闸限电。已有研究表明, 影响电网负荷变化的因子较多, 其中气象因子是影响电力负荷的主要因子之一。有学者曾对气象因子与电力负荷的关系及其预测做过研究, 张自银等^[1]指出北京市夏季日最低气温与逐日最大电力负荷的关系最为密切, 同时温度和湿度的综合效应比

温度单个因子对电力负荷波动的贡献率更高。李琛等^[2]指出气象因子对夏季电力负荷的影响存在“多日累积效应”。胡江林等^[3]指出华中电网日负荷与日平均气温的相关关系明显, 在日平均气温大于 20 °C 时相关系数为正, 小于 20 °C 时为负, 在平均气温为 25~28 °C 时负荷对气温的变化最敏感。叶殿秀等^[4]指出北京夏季日气象负荷与当日气温的相关系数最高, 与前一日气象负荷也关系密切。国内许多学者曾分别对国内其它区域或城市的电力负荷与气象因子的关系开展研究^[5-14], 得到了不同地区气象因子与电力负荷的关系。由于准确的电网负荷预测能带给电力市场巨大的经济效益, 同时也能明显减少能源损耗和浪费, 因此还有一部分国内外学者针对电网和市场需求开展了日最大电力负荷预测方面的研究。Lokoshchenko 等^[15]研究了近 25 年莫斯科市气温与电力消耗的关系及其演变特征, 指出了影响其电力消耗的主要气象因子。Ali 等^[16]研究

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

中国长江电力股份有限公司科研课题(241802002)“受电区域气象条件对用电负荷的影响研究”资助

作者简介: 李艳, 女, 1981 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事气象服务及应用气象研究, Email: 694117738@qq.com

收稿日期: 2020 年 7 月 2 日; 定稿日期: 2021 年 3 月 5 日

* 通信作者, Email: radargroup@foxmail.com

了巴基斯坦的极端高温与电力负荷之间的关系,并采用线性模型进行趋势拟合,取得了较好效果。Valor 等^[17]研究了西班牙的电力负荷与日温度变化的关系,说明了在西班牙电力负荷对温度变化的高度敏感性。Savi 等^[18]研究了塞尔维亚的城市地区电力消耗与冬夏季的冷暖气团维持的关系,并用支持向量机进行了电力负荷预测。Matsui 等^[19]基于可分析神经网络方法开展了电力峰值负荷的预报试验。Karsaz 等^[20]采用联合演化方法对电力负荷和纯市场化的电价进行了预测研究。在国内,罗森波、李强、洪国平、傅新妹等学者分别采用回归分析、机器学习等不同模型算法也对国内城市的电力负荷进行了预报试验^[21-27]。

本文选取的研究对象城市南京是我国东部特大型经济发达城市,国民生产总值位于国内前十附近,而人均消费水平则常年位列全国前 5。南京夏季高温高湿,昼夜温度差距小,体感温度高。夏季高温与较高的经济水平和人民生活水平等因素相叠加,使得南京夏季的电力需求非常旺盛。另外,由于南京夏季易受南北方天气系统及海上天气系统的共同影响,使其夏季电力需求变率及其影响因子的关系更加复杂。因此对南京地区夏季极端电力负荷变化规律及其与气象条件的关系做进一步深入研究,对于国内大型城市夏季极端电力负荷变化规律和预报研究具有较强的代表性,同时对于电网科学调度、有效调控及安全保障具有非常重要的实际价值。

1 数据与方法

1.1 数据来源及处理

本文研究所采用的电力负荷资料为南京市逐日 96 点采样电力负荷数据,资料时间是 2014 年 1 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日,除去 1 d 缺测,总计 1095 d 资料样本;选用的气象资料是南京市逐日气温(最高、最低、平均)、逐时气温、逐时湿度、逐时风速和逐时降水量以及 NCEP/NCAR 全球逐日平均再分析资料,分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。为了分析气象因子之间的综合效应,除了常规的气象要素以外,还引入了能表征夏季人体舒适度的炎热指数 I_D ^[28]。

$$I_D = 1.8t - 0.99(1 - 0.01h)(t - 14.4) + 32$$

式中, t 为气温($^{\circ}\text{C}$), h 为相对湿度($\%$)。

试验结果表明: $I_D \geq 80$,绝大多数人均感不适;

$I_D \geq 75$,半数人感到不适; $I_D \geq 70$,少数人(10%)感到不适; I_D 在 60~65,大部分人感到舒适。可简单规定: $I_D \geq 80, h > 50\%$ 时为高湿天气; $I_D \geq 80, h \leq 50\%$ 为高温天气。

1.2 极端负荷日的选取方法

本文以日最大电力负荷排名在当年夏季前 5% 的负荷日定为夏季极端负荷日,分析夏季逐月极端负荷时,以当年夏季各月的最大负荷日作为极端负荷日。

由于电力部门最关心的往往是出现高温高湿天气时,极端负荷曲线相对于平均负荷曲线的增幅和差异,从而能在极端天气情况下提前做好调度准备。因此,本文将当年夏季所有非极端负荷日的 96 点负荷进行平均,得到当年夏季的平均负荷曲线,而将极端负荷曲线与当年夏季的平均负荷曲线进行差值处理,得到两者的离差曲线(即极端负荷日相对于当年夏季平均负荷日的距平曲线)。

1.3 谱分析方法

1.3.1 功率谱分析方法

功率谱分析是以傅里叶变换为基础的频域分析方法,其意义为将时间序列的总能量分解到不同频率上,根据不同频率波的方差贡献诊断出序列的主要周期,从而确定周期的主要频率,即序列隐含的显著周期。本文运用功率谱分析方法对去季节趋势后的逐日时间序列做分析,研究天气尺度(1~10 d)、月尺度(10~30 d)、月际尺度(30~60 d)以及季节尺度(>60 d)的电力负荷各主要周期。

1.3.2 交叉谱分析方法

交叉谱分析是用来分析两个时间序列在不同频率之间相互关系的一种统计方法^[29]。交叉谱是复谱,可以看成是功率谱的扩展,其实部谱为协谱,虚部谱为正交谱,协谱反映的是某一频率上同位相的相关关系,而正交谱反映的是同一频率上两个序列位相相差 90° 的相关关系。另外,也可以将交叉谱表示为振幅与位相的形式,其中交叉振幅谱能够衡量两个序列的相关性,相位谱描述两序列的超前及滞后关系。为了排除量纲的影响,定义凝聚谱来反映两个时间函数在 ω 频域内信号的相关密切程度。本文运用交叉谱估计对电力负荷与自然周以及气温序列的相关关系进行分析。

2 结果分析

2.1 电力负荷特征分析

从南京 2014—2016 年逐日最大电力负荷曲线来看,2014—2015 年夏季的负荷走势相对平稳,而 2016 年夏季的负荷水平较前两年明显提升。分析发现,2016 年南京夏季的高温日数(22 d)为 2015 年的 2.4 倍,同时 2014—2016 年夏季极端负荷日对应的平均最高气温分别为:35.4 °C、36.3 °C、38 °C,可见 2016 年夏季明显更为炎热,因此夏季炎热程度对于负荷水平的影响叠加经济发展导致的电力负荷稳定上升,造成了 2016 年电力负荷大幅上升。

本文首先采用谐波分析方法拟合出原序列的季节变化及线性变化趋势(图 1)来具体分析南京逐日最大电力负荷随时间的周期变化,然后剔除季节趋势得到去季节趋势的逐日时间序列,再对其进行功率谱分析,得到 3 年总体和逐年电力日负荷变化周期。从图 1 可知,电力负荷有明显的季节波动性,冬夏季为负荷高峰,而在春秋季节为低谷期,且逐日波动幅度较大,达到 1000 MW 左右。从南京地区日最大

用电负荷功率谱(图 2a)可知,南京地区 2014—2016 年日最大电力负荷在季节尺度上有 72 d,即 2.4 个月左右的周期;在季节内(月际)尺度上,则存在 30 d(1 个月)左右的周期;在月尺度上有 11 d 和 15~18 d 两类波动;在月内尺度上,则有 3.5 d 和 7 d 左右的周期。同时,从图 2b~d 可知,月尺度波动不同年份的周期差异较大;而在月内尺度上,所有年份均出现了 7 d 左右的周期,说明南京地区日最大用电负荷有显著的 7 d 周期。

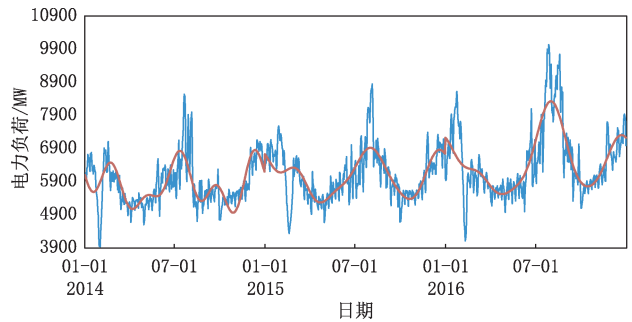


图 1 2014—2016 年南京逐日最大电力负荷变化及其季节变化趋势

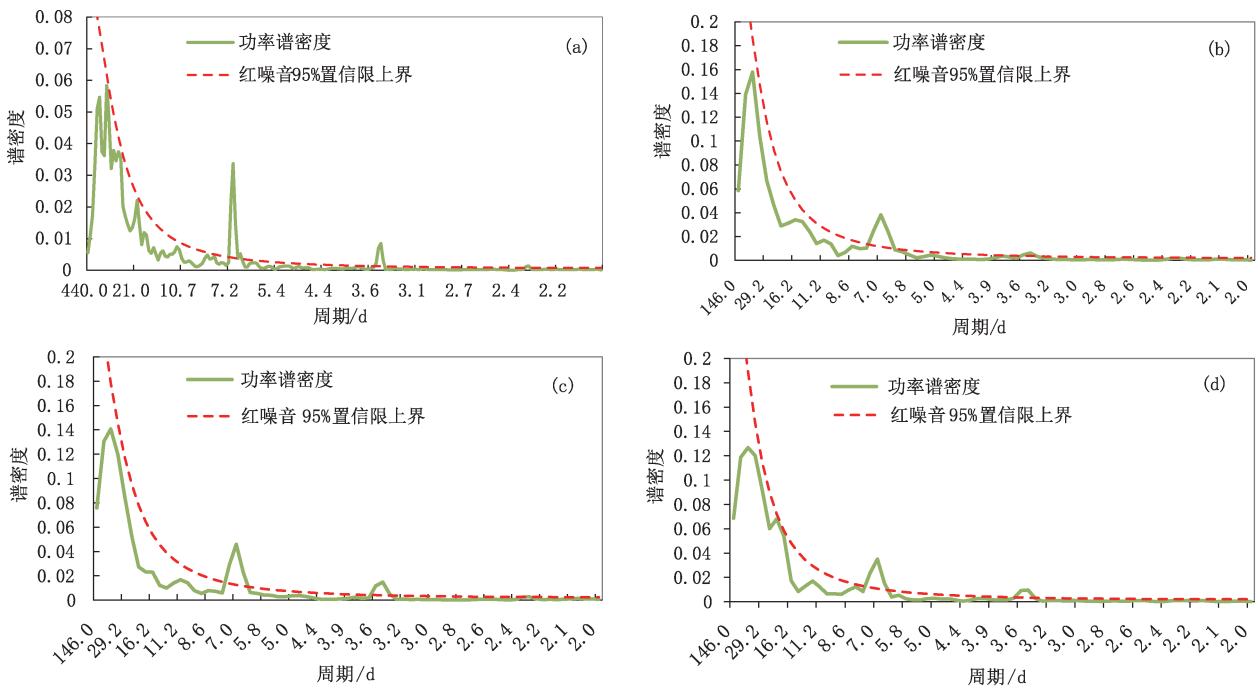


图 2 南京地区日最大用电负荷功率谱:

(a)2014—2016 年,(b)2014 年,(c)2015 年,(d)2016 年

为进一步弄清最大电力负荷的 7 d 周期是由天气周期造成的,还是由人类活动自然周的周一至周五工作而周六、周日休息的规律造成,本文采用交叉谱对 2014—2016 年南京逐日最大电力负荷与自然周循环两个序列在不同周期区间上的相关关系进行分析。结果表明,凝聚谱通过 $\alpha=0.05$ 的 F 分布显著性水平的周期正好在 5.6 d、6.2 d 和 7 d,而其他频率周期上无显著相关性,也与功率谱分析得到的 7 d 左右周期基本吻合,相应的周期后延时间长度为 0.34 d、0.35 d 和 0.26 d,说明最大电力负荷序列在 5~7 d 周期上基本与当日为星期几是同步的,即存在周末效应。通过资料查看也可以直接发现最大电力负荷一般存在周五至周六的骤减和周日至周一的突增。对 2014—2016 年夏季(6—9 月)日最大电力负荷与自然周循环两个序列进行交叉谱检验(表 1),只有 6.2 天周期通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,凝聚谱值减小,说明在同一时期,夏季日最大电力负荷的周末效应相对全年来说不明显。

表 1 2014—2016 年夏季日最大电力负荷与自然周交叉谱参数值

周期/d	凝聚谱	落后时间长度谱	F 检验值
7.0	0.079	0.337	6.79
6.2	0.139	0.348	12.857
5.6	0.079	0.258	6.839

2.2 夏季极端负荷日与平均负荷日的离差

由于极端负荷日是给电网安全稳定运行造成不良影响的主要因素,南京地区的电力极端负荷日基本上出现在夏季,因此本文通过分析该地区夏季极端负荷日与平均负荷日的离差曲线来进一步了解极端负荷日相较平均负荷日逐 15 min 负荷变化的差异,从而为电网削峰填谷等调度措施提供准确的科学依据。经分析发现,南京市 2014—2016 年夏季所有的极端负荷日离差曲线中存在 3 种类型,分别是典型双峰型、单峰型、非典型双峰型。①典型双峰型:一天之中负荷曲线存在白天和夜间两个高峰,其中白天峰值略高于夜间峰值。②单峰型:一天之中负荷曲线仅存在一个峰值,高峰出现在中午前后,夜间负荷水平整体较低,不存在明显上升情况。③非典型双峰型:一天之中负荷曲线存在白天和夜间两个高峰,其中夜间的峰值还略高于白天峰值。

从南京市 2014—2016 年夏季不同类型的极端

负荷日与平均负荷日的平均离差曲线(图 3)可见,典型双峰型和非典型双峰型的离差曲线走势非常相似,峰谷出现的时间基本同步,但不同的是典型双峰型的平均离差要明显高于非典型双峰型,而单峰型的平均离差峰值介于两者之间。从日用电量比较来看,典型双峰型最高,非典型双峰型次之,单峰型日用电量最低。

典型双峰型从 08:00—23:00 的平均离差均在 2000 MW 以上。而非典型双峰型平均离差 ≥ 2000 MW 的时段主要集中在 11:00—16:00 及 19:00—23:00。单峰型平均离差 ≥ 2000 MW 的时段主要集中在白天 09:00—14:00。2014—2016 年南京夏季极端负荷日中,典型双峰型出现概率最高(66.7%),单峰型次之,非典型双峰型最少(11.1%)。

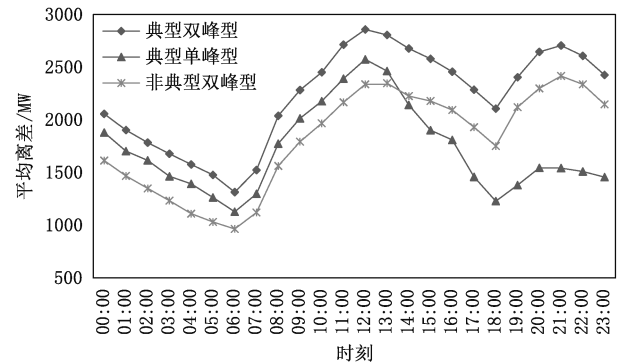


图 3 南京市 2014—2016 年夏季不同类型的极端负荷日与平均负荷日的平均离差日变化

分析 2014—2016 年南京夏季各月极端负荷与平均负荷的离差曲线发现(图 4),7 月呈典型双峰型,一天之中负荷曲线存在白天和夜间两个高峰;8 月离差曲线则呈典型单峰型,高峰出现在 10:00—14:00,夜间负荷水平整体较低,而 6 月和 9 月极端负荷与平均负荷的离差较 7、8 月明显偏低,这与 6 月和 9 月最高气温明显低于 7、8 月有关,极端负荷水平也同样明显低于盛夏时期,同时离差曲线的类型则介于典型双峰型和典型单峰型之间,一天之中负荷最高峰主要集中在 12:00—16:00。

2.3 夏季不同类型极端负荷日的气象条件分析

从过去研究可知,造成某一地区夏季极端电力负荷的原因比较复杂且各不相同,但一般都与气象因子有密切关系,其中气温是最重要的因子之一。本文先通过交叉谱分析夏季电力日最大负荷与最高、最低气温以及平均气温序列的周期相关关系,再

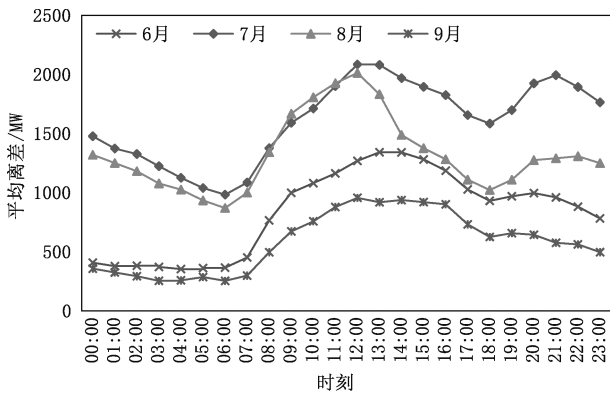


图 4 南京市 2014—2016 年夏季各月极端负荷日与平均负荷日的平均偏差日变化

通过对 3 种极端负荷日离差曲线类型与其对应的气象条件进行分析,得到不同极端负荷类型下不同气象因子关系及环流形势的特征。

2.3.1 夏季日最大电力负荷与气温的关系

在经济发达城市,由于人口密集,社会生产活动频繁,当夏季出现高温天气时,空调耗电量剧增导致电力负荷猛增。但影响电力负荷的气象因子并不仅是气温,降水、气压和湿度等气象因子对电力负荷也存在一定的影响。另外,对于气温的表征,除了逐时整点气温,表征一天气温状况的方式一般有日最高气温、日最低气温和日平均气温,而在不同地区日最大电力负荷与气温的不同表征因子的相关关系不尽相同。例如,北京地区夏季日最大电力负荷与日最低温度关系最密切^[1]。对于南京地区,本文将 2014—2016 年夏季日最大电力负荷与最高、最低气温以及平均气温日序列分别做交叉谱分析。结果表明,日最大电力负荷与日最高气温的关系最为密切,同时与日平均气温也表现出较好的相关性,而与日最低气温的相关性并不明显。从相关最显著的电力最大负荷与最高气温交叉谱(表 2)的特点来看,2~56 d 周期均通过了 0.05 的 F 显著性检验,且远大于 0.05 的临界值,即两者无论从高频周期到低频周期都显著相关。周期 56 d 为凝聚谱最高值,达到 0.853,说明低频月度周期的相关性最好。从位相谱来看,所有周期的位相都是最大电力负荷落后于最高气温,但都在 0~0.4 d 之间,说明电力负荷和最高气温两者基本上是同步的。从协谱都明显大于正交谱来看,相关的主要贡献来源于同位相的相关,也说明两者的同步性,而协谱的最大值在 28 d,其他周

期的协谱值差不多在 0.06 左右,说明日最高气温与电力负荷在月周期的相关对于总相关的贡献最大。

表 2 2014—2016 年夏季日最大电力负荷与日最高气温的交叉谱参数值

周期/d	协谱	正交谱	凝聚谱	落后时间长度谱	F 检验值
56.0	0.270	0.000	0.853	0.000	146.810
28.0	0.359	0.009	0.813	0.108	110.536
18.7	0.136	0.011	0.693	0.247	57.201
14.0	0.092	0.016	0.644	0.380	45.838
11.2	0.084	0.008	0.625	0.172	42.332
9.3	0.075	0.007	0.587	0.148	36.024
8.0	0.070	0.007	0.557	0.136	31.961
7.0	0.068	0.004	0.511	0.061	26.563
6.2	0.070	0.002	0.494	0.031	24.789
5.6	0.069	0.003	0.550	0.044	30.980
5.1	0.064	0.003	0.601	0.034	38.285
4.7	0.063	0.002	0.591	0.025	36.675
4.3	0.062	0.002	0.584	0.019	35.654
4.0	0.061	0.002	0.595	0.016	37.313
3.7	0.062	0.002	0.608	0.019	39.458
3.5	0.062	0.001	0.602	0.011	38.427
3.3	0.062	0.000	0.593	0.004	36.944
3.1	0.061	0.001	0.599	0.005	37.985
2.9	0.059	0.000	0.616	0.003	40.775
2.8	0.058	0.000	0.617	0.001	40.872
2.7	0.058	0.000	0.601	0.003	38.297
2.5	0.059	0.001	0.595	0.004	37.364
2.4	0.058	0.001	0.602	0.004	38.431
2.3	0.058	0.000	0.604	0.001	38.777
2.2	0.058	0.000	0.609	0.000	39.476
2.2	0.058	0.000	0.617	0.002	40.842
2.1	0.058	0.001	0.611	0.004	39.865
2.0	0.058	0.000	0.614	0.002	40.373
1.9	0.029	0.000	0.624	0.000	42.185

2.3.2 典型双峰型的气象条件

环流形势:南京地区为强大稳定的副热带高压(以下简称副高)控制,冷空气活动偏弱,气温日变化较小,导致南京地区高温持续时间长、用电负荷离差曲线呈现双峰型。以 2016 年 7 月 25—29 日的高温过程为例(图 5),亚欧中高纬呈现两槽一脊型分布,但环流经向度不大,影响我国的冷空气势力较弱且位置偏北。西太副高强度较常年同期偏强,并与大

陆高压打通,呈东西带状分布,副高 588 dagpm 线稳定控制 35°N 以南大部地区,造成南方地区大范围持续性高温天气。

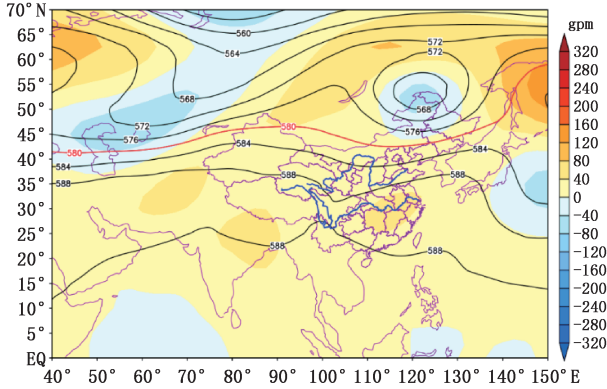


图 5 2016 年 7 月 25—29 日 500 hPa 平均高度 (等值线,单位:dagpm)及距平(填色)场

气象因子:典型双峰型高温持续时间长,35℃以上的高温持续时间为 5~10 h,白天出现峰荷的时间集中在 12:00—14:00,夜间出现次峰荷的时间主要集中在 20:00—21:00。从图 6a 中逐小时负荷与气温的散点图可以看出,小时气温在 32℃左右和 37℃左右对应的负荷有基本相当的情况,对应的即为夜间和白天双峰的情形。相对湿度方面,随着湿度的下降,负荷呈现逐步上升的趋势。白天气温上升,往往相对湿度下降,白天峰荷对应的相对湿度为 45%~60%之间,而夜间尽管气温下降,但由于相对湿度加大,导致体感仍旧闷热,夜间的峰荷对应的相对湿度在 55%~80%之间。

炎热指数能较好地表征了温度和湿度对人体舒适度产生的综合效应,从炎热指数与逐小时负荷的拟合曲线来看(图 6c),两者呈现明显的正相关关系。

2.3.3 单峰型的气象条件

环流形势:影响南京地区的冷空气活动频繁,副高具有东西摆动特征,南京地区气温日变化较大,多伴有阵雨或雷阵雨天气。以 2014 年 7 月 24 日(图 7)和 2015 年 8 月 6—7 日的高温过程为例(图 8),江苏上游均有中纬度低槽影响,副高主体位于海上,受冷空气和暖湿气流的共同影响,南京地区都出现了降水,造成地面气温下降,因此用电峰值一般出现在中午前后,夜间负荷水平整体较低。

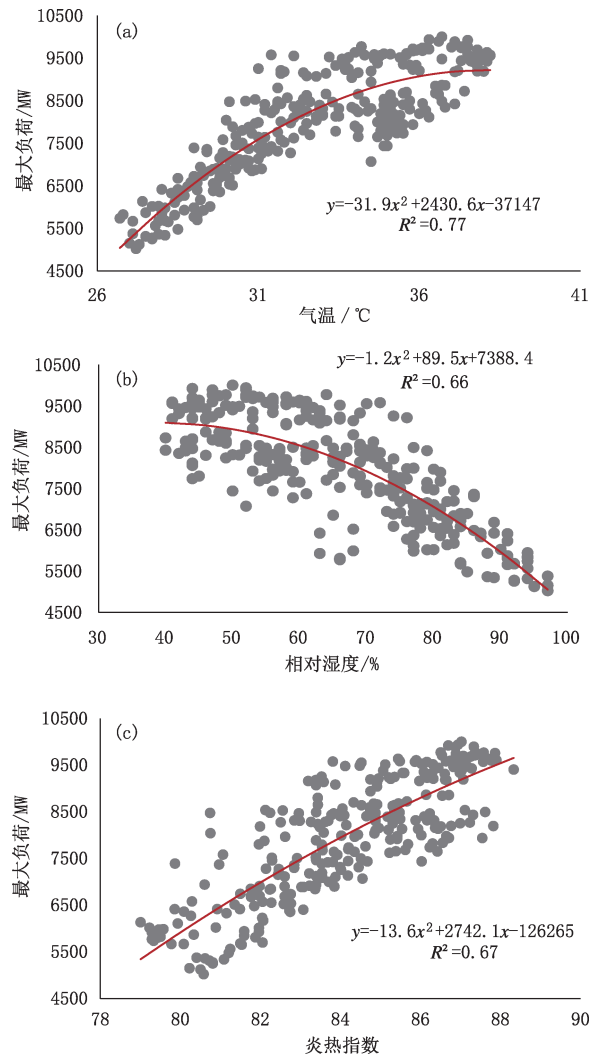


图 6 典型双峰型夏季极端负荷日逐小时最大负荷与气温(a)、相对湿度(b)、炎热指数(c)的散点图及拟合曲线

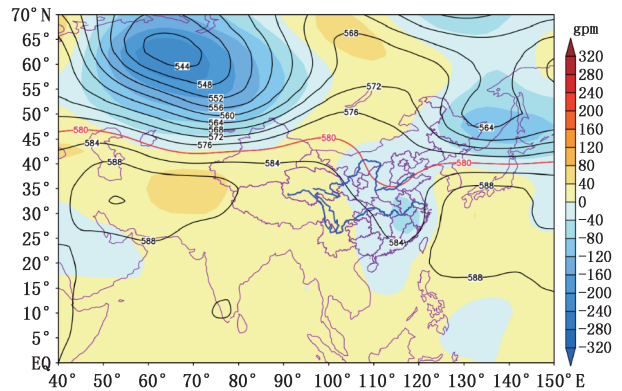


图 7 2014 年 7 月 24 日 500 hPa 平均高度 (等值线,单位:dagpm)及距平(填色)场

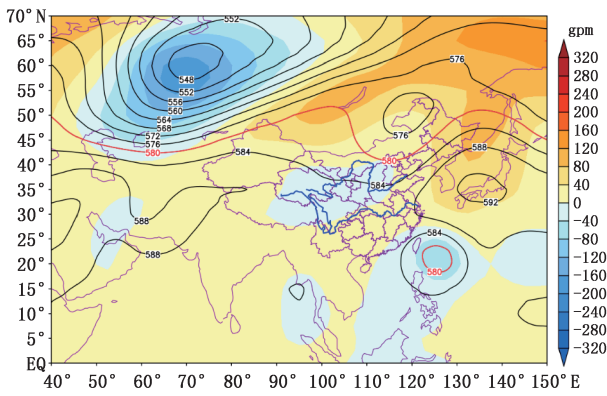


图 8 2015 年 8 月 6—7 日 500 hPa 平均高度 (等值线,单位:dagpm)及距平(填色)场

气象因子:白天无高温或高温出现时间较短,从 18:00 前后开始,气温陆续降到 30 °C 以下,夜间负荷水平较白天显著下降。和典型双峰型有所不同的是,单峰型相对湿度小、负荷高的情况在整个散点图中属于少数情况,这意味着高负荷在一天之中出现的时间很短。由于单峰型往往一天之中炎热持续时间不长,因此小时最大负荷与炎热指数拟合的效果并不好,但仍呈现正相关(图 9)。

2.3.4 非典型双峰型的气象条件

环流形势:非典型双峰型的日用电量介于典型双峰型和典型单峰型之间,所对应的环流场上副高强度弱于典型双峰型,冷空气的强度弱于典型单峰型。一般来说,南京地区为副高控制(副高强度比典型双峰型时的副高偏弱、西脊点偏东),冷空气活动较弱(比典型单峰型时的冷空气强度弱),气温日变化较小。以 2015 年 7 月 29 日的高温过程为例(图 10),亚欧中高纬呈现两槽一脊型分布,影响南京地区的冷空气势力较弱且位置偏北;副高 588 dagpm 线控制江苏、浙江等地,南京地区炎热天气持续时间长,同时夜晚气温下降缓慢,从而出现两个用电高峰。

气象因子:同典型双峰型类似,非典型双峰型往往炎热持续时间长,30 °C 以上的持续时间长达 16~17 h,高温持续时间长达 5~8 h,白天出现峰荷的时间集中在 13:00 前后。入夜后气温下降慢,但相对湿度较白天峰荷时增加 15%~20%,夜间出现峰荷的时间主要集中在 21:00 前后。从图 11a 也能看出,32 °C 所对应的部分小时最大负荷甚至高于 36 °C 所对应的小时最大负荷,这也能较好表明非典型双

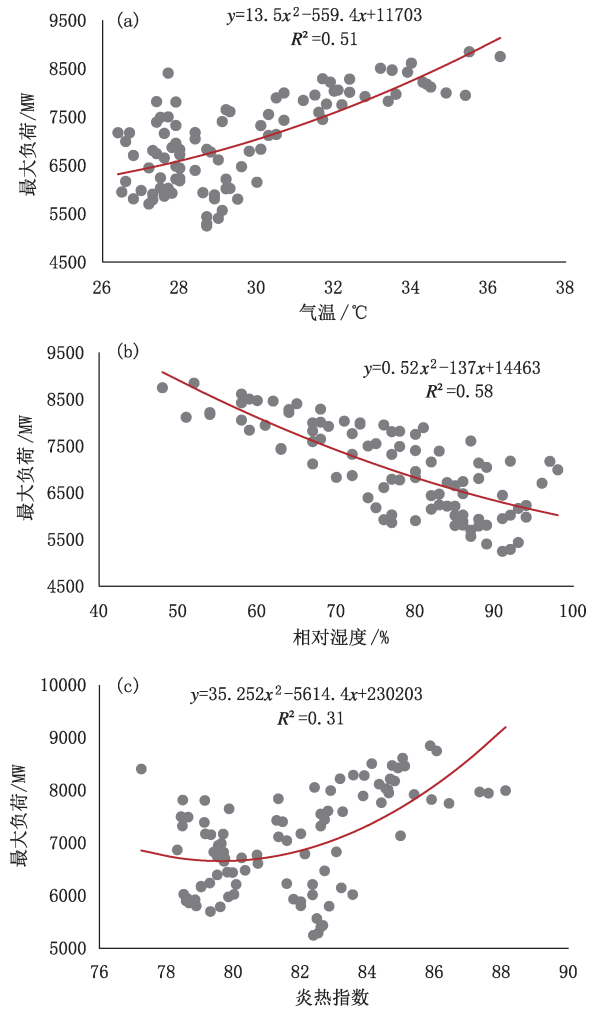


图 9 典型单峰型夏季极端负荷日逐小时最大负荷与气温(a)、相对湿度(b)、炎热指数(c)的散点图及拟合曲线

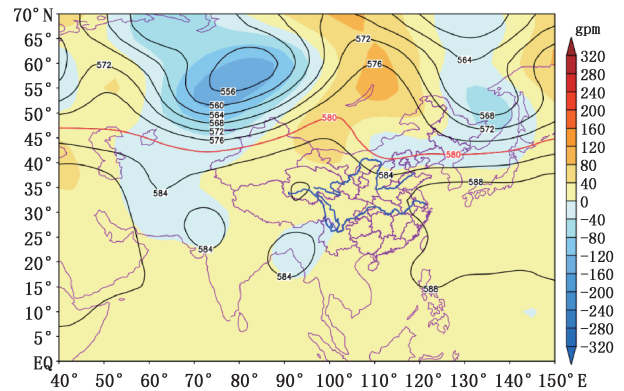


图 10 2015 年 7 月 29 日 500 hPa 平均高度 (等值线,单位:dagpm)及距平(填色)场

峰型的特点,即夜间的峰荷略高于白天。逐小时相对湿度与逐小时最大负荷呈现明显的负相关;其中

白天峰荷对应的相对湿度为 40%~50%之间,而夜间峰荷对应的相对湿度在 60%~65%之间。从图 11c

可见,随着炎热指数的增加,负荷呈逐步上升趋势, R^2 达到了 0.81,两者呈现显著的正相关关系。

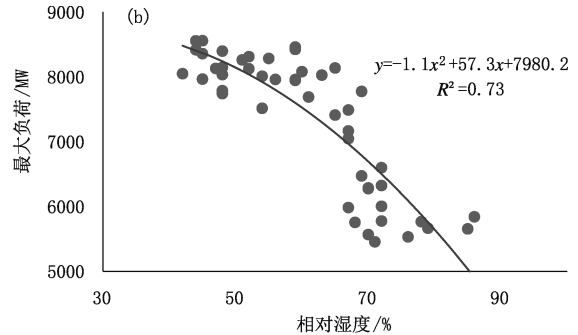
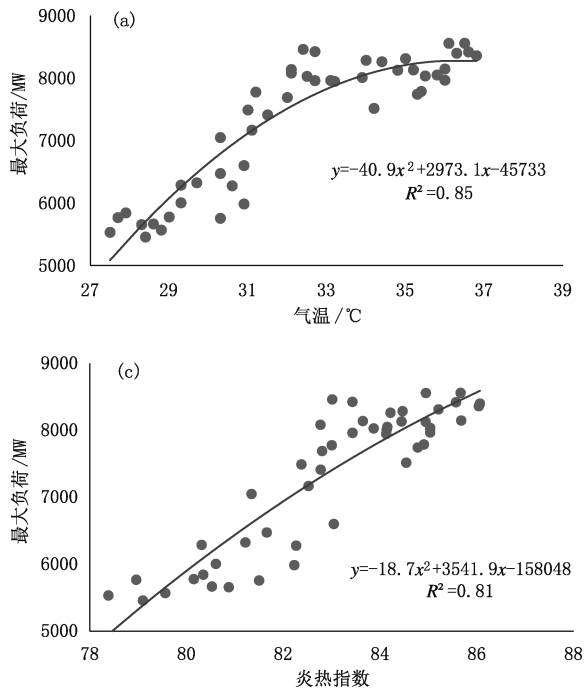


图 11 非典型双峰型夏季极端负荷日逐小时最大负荷与气温(a)、相对湿度(b)、炎热指数(c)散点图及拟合曲线

2.4 夏季不同类型极端负荷日的预测模型

从表 3 可见不同气象要素与不同类型极端负荷日的相关系数,回归建模时剔除了部分相关性较差的因子。从表 4 南京夏季不同类型极端负荷日的预测模型可以看出,典型双峰型入选的因子有逐小时气温、逐小时相对湿度和逐小时炎热指数,典型单峰型入选的因子为逐小时气温和逐小时相对湿度,而非典型双峰型仅仅只有逐小时炎热指数入选预测模型;3 种不同极端负荷日的预测模型平均相对误差

分别为 6.4%、5.6%和 5.3%,可以较好地为电力负荷提前做出定量预报服务。

表 3 南京夏季不同类型的极端电力负荷日与各要素的相关系数

自变量	典型双峰型	典型单峰型	非典型双峰型
X_1 逐小时气温	0.85**	0.71**	0.88**
X_2 逐小时相对湿度	-0.79**	-0.76**	-0.84**
X_3 逐小时炎热指数	0.81**	0.50**	0.90**

注:**表示通过 0.01 的显著性检验,下同。

表 4 南京夏季不同类型的极端电力负荷日预测模型

极端电力负荷日类型	预报模型	F 值	R^2	平均相对误差/%
典型双峰型	$Y = -23125.68 - 571.99X_1 - 107.14X_2 + 674.36X_3$	317.9	0.78**	6.4
典型单峰型	$Y = 6730.82 + 108.83X_1 - 37.95X_2$	39.5	0.53**	5.6
非典型双峰型	$Y = -31205.1 + 464.25X_3$	189.9	0.81**	5.3

3 结论与讨论

通过对南京市 2014—2016 年逐时和逐日电力负荷进行特征分析和周期规律研究,结合不同极端电力负荷离差曲线类型与气象条件的关系分析,得出以下结论:

(1)南京地区电力负荷特征属于典型的夏冬双峰型,从功率谱分析结果来看,南京地区 2014—2016 年日最大电力负荷在季节内/月际尺度上,存在 30 d 左右的周期;在天气尺度上,7 d 左右的周期最为显著,而 7 d 左右周期与周末效应存在明显同位相相关,滞后时间长度 0.3 d 左右。

(2)南京地区夏季日最大电力负荷与日最高气温变化的相关性最为显著,与日平均气温的变化也有明显的相关性。在2~56 d周期区间上,两个序列的相关性都非常显著,其中28~56 d周期的相关贡献较大。同时,在所有周期上最大电力负荷相对于日最高气温滞后都小于0.4 d,基本上同步变化。

(3)南京夏季极端负荷日与平均负荷日的平均离差曲线存在典型双峰型(I)、单峰型(II)、非典型双峰型(III);而盛夏7月和8月的平均离差曲线分别为I型和II型。从日用电量来看,I型最高,III型次之,II型的日用电量最低。3种类型的逐小时最大负荷与气温、炎热指数都呈现显著的正相关,与相对湿度呈现显著的负相关。从环流形势特征来看,I型对应着南京地区往往受强大稳定的副高控制,冷空气活动偏弱,气温日变化较小;II型则对应着影响南京地区的冷空气活动频繁,副高具有东西摆动特征,南京地区气温日变化较大,并伴有阵雨或雷阵雨天气;而III型的日用电量介于I型和II型之间,所对应的环流场上副高强度弱于I型,冷空气强度弱于II型,以上结论对于提前研判极端负荷日具有较好的指导意义。

(4)利用逐步回归方法建立南京夏季不同类型极端负荷日的预测模型,I型、II型和III型的平均相对误差分别为6.4%、5.6%和5.3%,可以较好地为南京地区极端电力负荷提前做出定量的预报服务。

参考文献

- [1] 张自银,马京津,雷杨娜.北京市夏季电力负荷逐日变率与气象因子关系[J].应用气象学报,2011,22(6):760-765.
- [2] 李琛,郭文利,吴进,等.北京市夏季日最大电力负荷与气象因子的关系[J].气象与环境学报,2018,34(3):99-105.
- [3] 胡江林,陈正洪,洪斌,等.华中电网日负荷与气象因子的关系[J].气象,2002,28(3):14-18.
- [4] 叶殿秀,张培群,赵珊珊,等.北京夏季日最大电力负荷预报模型建立方法探讨[J].气候与环境研究,2013,18(6):804-810.
- [5] 尹焰寅,范进进,陈幼姣,等.体感温度对夏季气象负荷率变化的影响研究——以湖北省黄石市为例[J].气象,2017,43(5):620-627.
- [6] 卢珊,高红燕,李建科,等.西安市居民用电量对气象因子的响应及预测[J].干旱气象,2017,35(5):886-892.
- [7] 熊明明,李明财,任雨,等.天津电力负荷特性及其与气象因子的关系[J].气象科技,2013,41(3):577-582.
- [8] 张小岭,王迎春.北京夏季用电量与气象条件的关系及预报[J].气象,2002,28(2):17-20.
- [9] 刘红亚,曹亮.上海市电力负荷与气象因子关系及精细化预报[J].应用气象学报,2013,24(4):455-463.
- [10] 张海东,孙照渤,郑艳,等.温度变化对南京城市电力负荷的影响[J].大气科学学报,2009,32(4):536-542.
- [11] 陈正洪,洪斌.华中电网四省日用电量与气温关系的评估[J].地理学报,2000,55(增刊):34-38.
- [12] 张立祥,陈立强,王明华.城市供电量与气象条件的关系[J].气象,2000,26(7):27-31.
- [13] 钟利华,李勇,叶殿秀,等.综合气象因素对广西电力负荷的影响[J].气象,2008,34(5):31-37.
- [14] 朱振伟,方鸽飞,王国福,等.电网夏季气象敏感负荷特性分析[J].华东电力,2008,36(9):53-58.
- [15] Lokoshchenko M A, Nikolaeva N A. Dependence of energy consumption on air temperature in Moscow [J]. Russ Meteorol Hydrol, 2017, 42: 783-791.
- [16] Ali M, Iqbal M J, Sharif M. Relationship between extreme temperature and electricity demand in Pakistan [J]. Int J Energy Environ Eng, 2013, 36(4): 1-7.
- [17] Valor E, Meneu V, Caselles V. Daily air temperature and electricity load in Spain [J]. J Appl Meteor, 2001, 40: 1413-1421.
- [18] Savi S, Selakov A, Milošević D. Cold and warm air temperature spells during the winter and summer seasons and their impact on energy consumption in urban areas [J]. Nat Hazards, 2014, 73: 373-387.
- [19] Matsui T, Lizaka T. Peak load forecasting using analyzable structured neural network [C] // IEEE PES 2001 Winter Meeting, Columbus, Ohio USA, 2001.
- [20] Karsaz A, Mashhadi H R, Eshraghnia R. Cooperative co-evolutionary approach to electricity load and price forecasting in deregulated electricity markets [C] // IEEE Power India Conference, India, 2006.
- [21] 罗森波,纪忠萍,马煜华,等.2002—2004年广东电力负荷的变化特征及预测[J].热带气象学报,2007,23(2):153-161.
- [22] 李强,柯宗建.河南夏季日最大电力负荷预测模型[J].气象科技,2014,42(4):707-711.
- [23] 洪国平,崔新强,任永建,等.夏季武汉市电网气象敏感负荷预测模型[J].气象科技,2015,43(3):557-560.
- [24] 傅新姝,谈建国.基于滤波技术的上海日最大电力负荷气象预报模型[J].气象科技,2015,43(6):1209-1212.
- [25] 卢珊,浩宇,王百朋,等.引入积温效应预测夏季西安市电力气象负荷[J].气象科技,2017,45(6):1090-1094.
- [26] 成丹,刘静,郭淳薇,等.基于积温效应的华中电网电力负荷预测[J].气象科技,2018,46(4):814-821.
- [27] 朱清智,董泽,马宁.基于即时学习算法的短期负荷预测方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(7):92-98.
- [28] 陈正洪,王祖承,张鸿雁.炎(闷)热指数在武汉市的试用、修订及检验[J].湖北气象,2000(3):23-25.
- [29] 黄嘉佑.气象统计分析与预报方法[M].北京:气象出版社,1990:231-237.

Characteristics of Electric Loads in Nanjing and Relationship between Extreme Loads and Meteorological Conditions in Summer

LI Yan¹ YU Jianwei² CAI Xiangning³ FAN Xiaoqing¹ HUANG Yan¹

(1 CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081; 2 Jiangsu Provincial Meteorology Observatory, Nanjing 210008;

3 National Meteorological Center, CMA, Beijing 100081)

Abstract: Based on the daily power load data in Nanjing from 2014 to 2016, using the harmonic analysis and power spectrum method, etc., the study analyzes the change rule and characteristics of power loads in Nanjing, and the relationship between the daily curve of power load and the meteorological elements such as temperature and humidity in extreme power load days. The results show that the seasonal variation of power loads in Nanjing is mainly bimodal. On the intra-month scale, there is a significant 7-days period change, which is significantly corresponding to weekly circulation. There are three types of daily extreme load deviation curves: typical bimodal (I), unimodal (II), and atypical bimodal (III). The types I and III show significant positive correlation with temperature and hotness index, while all the three types show significant negative correlation with relative humidity. Then, the type I corresponds to the circulation controlled by a strong and stable sub-high over Nanjing, weak cold air activity, and small temperature diurnal variation. The type II happens while Nanjing is affected by frequent cold air activities and the east-west swing subtropical high, when showers or thunderstorms usually happen in Nanjing. The intensity of the subtropical high corresponding to type III is weaker than that to type I, and the degree of cold air activity is weaker than that to type II. The stepwise regression method is adopted to establish prediction models for different types of extreme load days. The average relative errors of the prediction models based on the three types are 6.4%, 5.6%, and 5.3%, respectively, which can provide good quantitative power load forecasts for extreme power load days in Nanjing.

Keywords: electric load; extreme daily load; power spectrum; cross spectrum; meteorological condition